

Incremento da irradiância solar incidente na superfície do reservatório da hidroelétrica Serra da Mesa no centro-oeste brasileiro

Fernando Ramos Martins¹
André Rodrigues Gonçalves²
Rodrigo Santos Costa²
Madeleine Sánchez Gácita Casagrande¹
Francisco José Lopes de Lima²
Marcelo Pizzuti Pes²
Enio Bueno Pereira²

¹Universidade Federal de São Paulo

²Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

RESUMO

A maioria das usinas hidrelétricas brasileiras possui grandes reservatórios que induzem extensas mudanças no ambiente local. Neste trabalho, investigamos os impactos na nebulosidade local e na irradiação solar superficial na usina hidrelétrica de Serra da Mesa, localizada na região central do Brasil. Imagens GOES-16, produtos ISCCP e dados de superfície foram utilizados para a avaliação estatística da frequência de nebulosidade. Os resultados apontaram que a nebulosidade média ao longo do dia e no período vespertino aumenta à medida que nos afastamos do reservatório. A redução da nebulosidade sobre o reservatório varia de 4% no verão até 8% no outono e primavera. A irradiância solar incidente no reservatório foi superior à incidência no entorno em cerca de 1,75% para a média diária e de 4,59% para o período vespertino. O resultado demonstra que usinas fotovoltaicas flutuantes podem ser uma alternativa para integrar uma planta híbrida de geração de eletricidade em Serra da Mesa. Estudos estão em andamento para reservatórios de outras hidroelétricas.

Palavras-chave: Reservatórios de Hidroelétricas, Brisa lacustre, Energia Solar, Geração híbrida.

ABSTRACT

Most of the Brazilian hydropower plants have large water reservoirs that induce extensive changes in the local environment. In this work, we investigate the breeze influence on local cloudiness and incoming solar irradiation at the Serra da Mesa hydropower plant, located in the Central region of Brazil. GOES-16 imagery, ISCCP products, and ground data were available for the statistical evaluation of the cloudiness frequency. The results pointed out that the daily average cloudiness increases as we move away from the reservoir. The same pattern was noticed at the afternoon-only cloudiness. The cloudiness reduction over water surface ranges from 4% in austral summer to 8% during fall and spring. The average of the incoming solar irradiance at the water surface was around 1.75% and 4.59% higher at the afternoon hours higher than neighboring areas. The results demonstrated that floating PV power plant could be an alternative to integrate both solar and hydro energy resource into a hybrid power generation in Serra da Mesa. Studies are ongoing for other Brazilian hydropower dams.

Keywords: Lake breeze influence, Hydropower reservoir, Solar irradiance enhancement, Solar energy resource

1. INTRODUÇÃO

A circulação de brisa em lagos é um fenômeno induzido termicamente bastante conhecido na meteorologia de mesoescala. Rabin et al. (1990) utilizaram imagens do satélite GOES e relataram bandas sem nuvens na direção do vento durante a estação quente em grandes lagos nos EUA. Segal et al. (1997) avaliaram os fenômenos da brisa do lago na Flórida (EUA) usando as modelagens e abordagens observacionais, e relataram que as forças atmosféricas induzidas por subsidência e supressão da nuvem cumulus contribuem mutuamente para o aumento da frequência de condições sem nebulosidade sobre os lagos. Asefi-Najafabady et al. (2010) mencionaram uma zona livre de nuvens ao longo de lago situado no Alabama (USA). Iakunin et al. (2018), com base em observação e modelo, mostrou que a brisa no reservatório de Alqueva, em Portugal, podia ser detectada a mais de 6 km das margens do reservatório.

Estudos numéricos sobre a dinâmica da brisa em reservatórios de água também contribuíram significativamente para a compreensão desse fenômeno. Crosman & Horel (2010) apresentaram uma extensa revisão sobre o assunto. Entre os fatores de consenso que afetam a ocorrência da brisa estão o fluxo de calor sensível à terra, o vento sinótico, a estabilidade atmosférica, as dimensões das bacias hidrográficas, a inclinação do terreno e a rugosidade. Nas regiões tropicais, há um potencial aumentado de brisa devido à maior evapotranspiração e disponibilidade de calor. Um exemplo peculiar é o fenômeno de poucas nuvens sobre os grandes rios da Amazônia (Silva Dias et al., 2004). Yis et al. (2009) analisaram o ciclo diário de nebulosidade sobre o lago Victoria (África Oriental) e verificaram uma variabilidade de até 22% na nebulosidade entre dia e noite.

A formação de grandes reservatórios para alimentar grandes usinas hidrelétricas em regiões tropicais pode apresentar um padrão semelhante de brisa do lago (Assireu et al., 2016; Ekhtiari, 2017; Iakunin, 2018). A substituição da cobertura vegetal pelos reservatórios de água causa intensos gradientes térmicos entre a área inundada e o território circundante que desencadeia a circulação da brisa do lago e afeta o ciclo hidrológico, balanço energético, nebulosidade local. Stivari et al. (2005) mostraram que a circulação da brisa é uma característica dominante no clima local no reservatório da usina hidrelétrica Itaipu. Apesar deste estudo, a caracterização do efeito da brisa em reservatórios tropicais ainda é incerta. Neste trabalho, investigamos os impactos da brisa causada pela presença do reservatório de hidroelétrica na nebulosidade local e na irradiação solar incidente na superfície com base na avaliação estatística de dados observacionais. Os resultados podem contribuir com informações abrangentes sobre os recursos de energia solar nas barragens hidrelétricas que operam em regiões tropicais.

2. METODOLOGIA

2.1 Hidroelétrica de Serra da Mesa

A usina hidrelétrica Serra da Mesa está localizada entre os estados de Goiás e Tocantins (região central do Brasil) (Figura 1a). A usina possui uma capacidade instalada de 1275 MW e seu reservatório foi estabelecido em 1998 em uma região originalmente coberta por savanas de pastagens tropicais. Devido à geomorfologia da

bacia hidrográfica, o lago apresenta um padrão dendrítico, cobrindo uma superfície de aproximadamente 1784 km² e com profundidade máxima em torno de 150 m. A largura do reservatório atinge até 8 km e o volume total de água é de cerca de 54,4 bilhões de m³. As elevações próximas ao longo do rio Tocantins variam de um mínimo de 340 m a 1100 m acima do nível médio do mar. O clima regional é tropical, com invernos secos totalizando 1600 mm de precipitação por ano. A estação chuvosa ocorre de outubro a abril. Os ventos são geralmente calmos (2-3 m/s), e a temperatura média permanece acima de 24 °C durante o ano todo.

2.2 Bases de dados disponíveis

A Figura 1(c) mostra a localização do sistema baseado em bóia para monitoramento ambiental (SIMA) usado para aquisição de dados meteorológicos, incluindo temperatura do ar, umidade, pressão do ar, intensidade do vento.

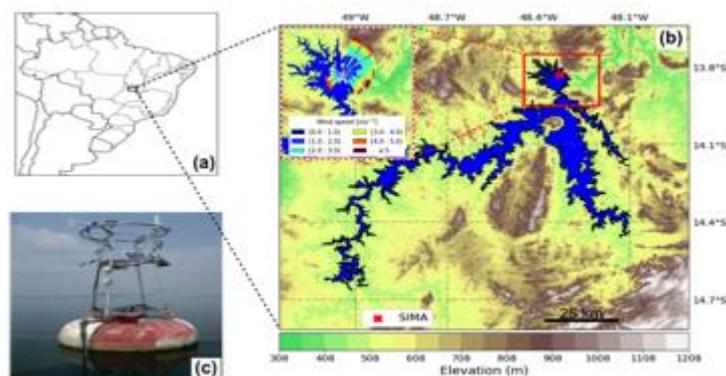


Figura 1 – (a) A localização do reservatório de Serra da Mesa na região central do Brasil (b) a geografia do lago e (c) o sistema de bóia de coleta de dados SIMA operando no ponto vermelho.

Além dos dados adquiridos em superfície, dois conjuntos de dados derivados de satélite foram usados para avaliar as distribuições espaciais e temporais da nebulosidade: as imagens visíveis da América do Sul adquiridas pelo GOES-16 e as imagens de satélite em grade (GridSat-B1) (Rossow et al., 1996). Para obter um diagnóstico detalhado do padrão de nuvens sobre o reservatório hidrelétrico e suas margens, foram utilizadas imagens visíveis RED adquiridas em intervalos de uma hora em 2018. O cálculo índice de cobertura efetiva da nuvem (C_{eff}) a partir de imagens GOES foi realizada como descrito na Eq. (1) por Moser e Raschke (1984).

$$C_{eff} = \frac{R - R_{min}}{R_{max} - R_{min}} \quad (1)$$

onde R é a refletância visível observada pelo satélite GOES em um pixel específico, e R_{min} e R_{max} são, respectivamente, as refletâncias mínima e máxima para a condição de céu sem nuvens e nublado, estimadas com base em uma análise estatística dos dados de satélite observados no mesmo pixel em um período de 30 dias. Observe que C_{eff} é um coeficiente sem dimensão e pode assumir valores de zero (condição sem nuvens) a um (condição de nebulosidade opticamente muito espessa). Além disso, C_{eff} apresenta uma relação quase linear com a transmitância da radiação solar nas nuvens (Stuhlmann et al., 1990).

O produto GridSat-B1 baseia-se na base de dados ISCCP-B1 do Projeto Internacional de Climatologia de Nuvem por Satélite (ISCCP). O GridSat-B1 está em uma resolução de superfície de $0,07^\circ$ e resolução temporal de 3h. O produto engloba dados de três canais de banda espectral: infravermelho (em torno de $11,0 \mu\text{m}$), vapor de água (em torno de $6,7 \mu\text{m}$) e visível. O produto abrange o período de 1985 a 2013, permitindo uma avaliação da nebulosidade antes e depois da formação do reservatório de Serra da Mesa. A temperatura do brilho infravermelho (BT) e a refletância visível (R) foram utilizadas como proxies para ocorrência de nebulosidade (Bottino e Ceballos, 2015). A diferença entre o BT observado “depois” e “antes” do reservatório foi avaliada para o reservatório e as margens circundantes. A diferença positiva entre os valores BT indica nuvens mais rasas ou uma ocorrência menor de nuvens. Um procedimento semelhante foi adotado usando dados de refletância. O sinal da diferença entre os valores de refletância “depois” e “antes” da construção do reservatório indica um aumento (+) ou diminuição (-) na espessura óptica da nuvem ou na frequência de ocorrência de nuvens.

2.2 Influência da brisa sobre a irradiância solar incidente na superfície

O índice de claridade (k_t) foi utilizado para avaliar o efeito da brisa do lago na irradiância solar recebida na superfície da água e nas áreas de terra ao redor do reservatório da Serra da Mesa. O índice k_t é definido como descrito na eq. (2):

$$k_t = \frac{GHI}{GHI_0} \quad (2)$$

onde GHI e GHI_0 são a irradiância solar horizontal global recebida na superfície e no topo da atmosfera, respectivamente. O GHI_0 é obtido numericamente a partir da localização geográfica e do ângulo do zênite solar.

A relação entre o índice de clareza (k_t) e a cobertura efetiva de nuvens (C_{eff}) obtida a partir de imagens de satélite foi introduzida pela primeira vez por Moser & Raschke, (1984) e é o parâmetro crítico de muitos algoritmos numéricos para estimativa de irradiância solar na superfície (Beyer et al., 2004). Em resumo, a irradiância solar de entrada na superfície depende apenas da transmitância atmosférica na condição de céu sem nuvens (τ_{clear}). Pelo contrário, na condição $C_{eff} = 1$, a transmitância atmosférica (τ_{cloud}) está ligada à maior espessura óptica da nuvem, sem irradiância solar direta atingindo a superfície. O intervalo entre essas duas transmitâncias define a função que converte C_{eff} em irradiância solar horizontal global (GHI) na superfície (eq. 3).

$$k_t = \frac{GHI}{GHI_0} = \{(1 - C_{eff})(\tau_{clear} - \tau_{cloud}) + \tau_{cloud}\} \quad (3)$$

Os valores de τ_{clear} são intrinsecamente relacionados aos gases atmosféricos e concentração de aerossóis, conteúdo de água e massa de ar. A transmitância atmosférica para situações intermediárias será a mais afetada pela cobertura de nuvens e pela espessura óptica das nuvens na condição de céu nublado. O modelo simples de céu-claro, descrito na eq. (4), foi ajustado para considerar a influência do ângulo zenital (massa de ar) (Bourges, 1979).

$$k_{t_clear} = A. (\cos(\theta_z))^{1.15} \quad (4)$$

O valor típico de k_{t_cloud} a partir de medições no solo para a região do reservatório da Serra da Mesa foi um desafio porque as nuvens espessas necessárias para bloquear a irradiância do feixe solar não acontecem com muita frequência e

podem ser enganosas devido à sombra, ruído ou falta de manutenção. O valor $k_{t_cloud} = 0,04$ foi adotado com base em Stuhlman et al. (1990).

3. RESULTADOS

Os mapas de C_{eff} foram calculados a partir de imagens do satélite GOES-16 para uma região que cobre até 100 km de distância das margens do reservatório da hidroelétrica Serra da Mesa. As diferenças nos padrões de nebulosidade sobre a superfície do reservatório e das áreas circundantes são aparentes nos campos espaciais mostrados na Figura 2. Imagens de satélite GOES-16 adquiridas entre 09h - 11h e entre 14h - 16h (hora local) foram utilizadas para preparar os mapas da com média sazonal para os períodos da manhã e da tarde.

A nebulosidade reduzida durante a tarde sobre o reservatório em comparação com o seu entorno é evidente. Essa redução da nebulosidade parte de 4% no verão (DJF) e pode atingir valores de até 8% durante o outono (MAM) e primavera (SON). Os mapas mostram uma deriva de sudoeste na janela sem nuvens em relação ao reservatório devido aos ventos predominantes do nordeste. Apesar do sinal visual, uma análise estatística foi realizada para comparar a nebulosidade em seis áreas-alvo em diferentes locais dentro da região do domínio: a superfície da água na área inundada contígua com pelo menos 2 km de largura; as fronteiras do reservatório delineadas com até 2 km das margens; e quatro áreas distribuídas em regiões cardeais (N, E, S, W) a mais de 2 km das margens do reservatório. Essas quatro áreas distantes do reservatório foram escolhidas em locais que apresentam a topografia típica da região onde o reservatório está localizado.

O ciclo diário da climatologia de nebulosidade é mostrado na Figura 3. O gráfico de linhas endossa as características recorrentes da brisa do lago, iniciando por volta das 12h (hora local) e produzindo diferenças nos valores de C_{eff} até 0,05 (25%) entre o reservatório e as áreas externas. As margens mostram um comportamento intermediário entre a superfície da água e as áreas externas.

A Tabela 1 mostra o aumento relativo de nebulosidade em relação à superfície da água. A Tabela 1 valida as conclusões obtidas da observação visual dos mapas de C_{eff} na Figura 2. A nebulosidade aumenta à medida que nos afastamos do reservatório em qualquer uma das quatro direções cardinais. O mesmo padrão é

observado para nebulosidade no período vespertino (14h às 16h). Comparando a nebulosidade em áreas externas combinadas com a nebulosidade sobre a superfície da água, os valores médios de C_{eff} aumentam 5,7% e 19,0% para os períodos diário e vespertino, respectivamente.

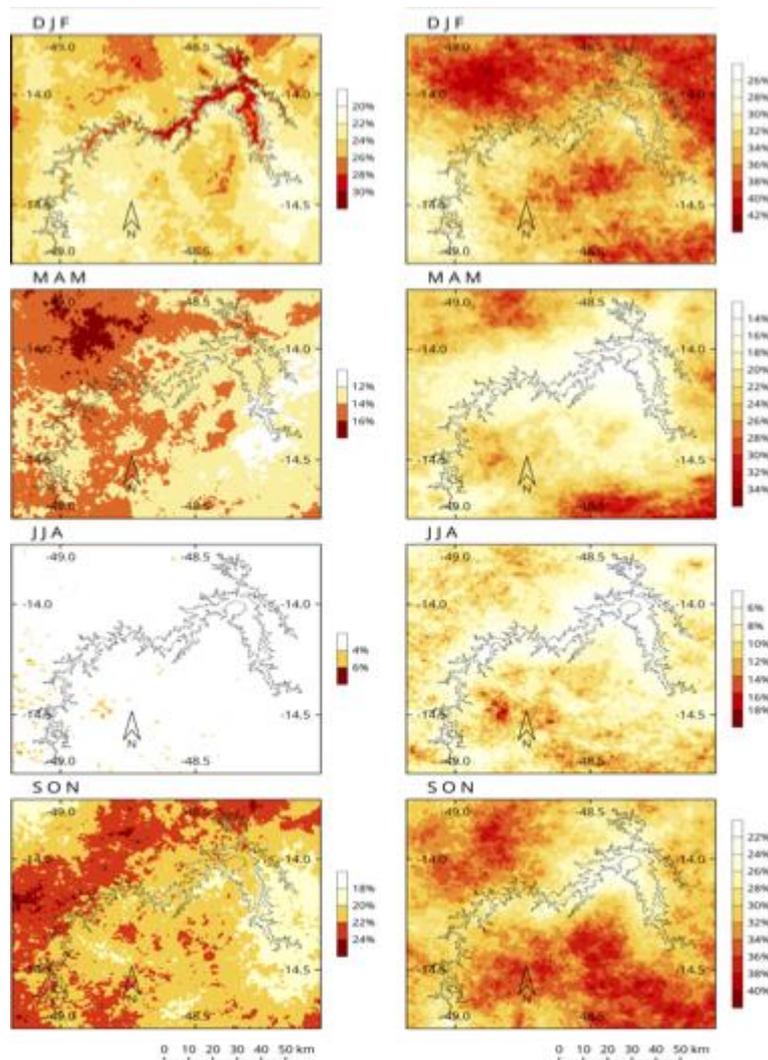


Figura 2 – Mapas sazonais das estimativas médias de C_{eff} (%) sobre o reservatório da Serra da Mesa para os períodos da manhã entre 9-11 (lado esquerdo) e tarde entre 14-16 (hora local).

Os resultados acima mostraram que existe um padrão de nebulosidade espacial e que o reservatório provavelmente o induz. No entanto, ainda se pode argumentar que as áreas internas e externas do reservatório não são semelhantes o suficiente e que outros fatores, além do próprio reservatório, podem impactar a nebulosidade local. A Figura 4 invalida o argumento apresentando as diferenças médias de nebulosidade antes e após a construção do reservatório estimados a partir

do conjunto de dados GridSat-B1. Ambas as imagens sugerem que a nebulosidade nas áreas externas excede a nebulosidade sobre a superfície da água do reservatório. Portanto, a Figura 4 endossa os resultados anteriores deste trabalho e de outros estudos (Iakunin et al., 2018) apontando que a presença do reservatório induz um sistema de brisa que inibe a formação de nuvens por causa do subsidência do ar seco das camadas atmosféricas superiores.

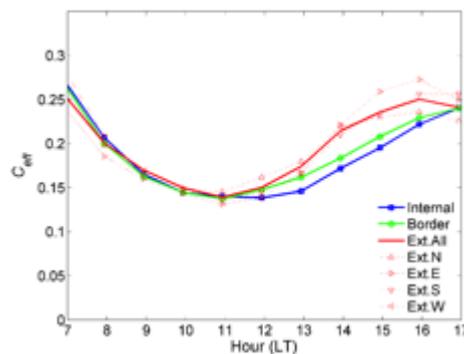


Figura 3 – Nebulosidade média horária para a região do reservatório Serra da Mesa durante 2018.

Tabela 1 – Comparação dos valores médios de nebulosidade (C_{eff}) sobre o reservatório de Serra da Mesa e áreas circunvizinhas para o período diário e vespertino.

Areas	Diário	Diferença Relativa em relação à superfície da água	Vespertino	Diferença Relativa em relação à superfície da água
Reservatório	18.7%	-	19.6%	-
Margens	18.8%	0.5%	20.7%	5.4%
Externa Norte	19.6%	4.7%	22.9%	16.4%
Externa Leste	19.7%	5.0%	25.1%	27.9%
Externa Sul	20.0%	6.6%	23.3%	18.7%
Externa Oeste	19.9%	6.4%	22.2%	13.0%
Externa Combinada	19.8%	5.7%	23.4%	19.0%

O índice k_t foi calculado usando a Eq. 1 para os valores de C_{eff} obtidos com satélite GOES-16. A Tabela 2 compara o efeito da nebulosidade reduzida na irradiância solar recebida sobre a área da do reservatório, assumindo como referência a irradiância solar incidente nas áreas externas. Os resultados demonstram o incremento sistemático da irradiância solar recebida no reservatório em comparação com as margens próximas ou áreas externas do reservatório Serra da Mesa. A média

anual do incremento da irradiância na superfície da água foi de 1,73% para o ciclo diária e de 4,51% para o período vespertino (entre 14h e 16h, hora local).

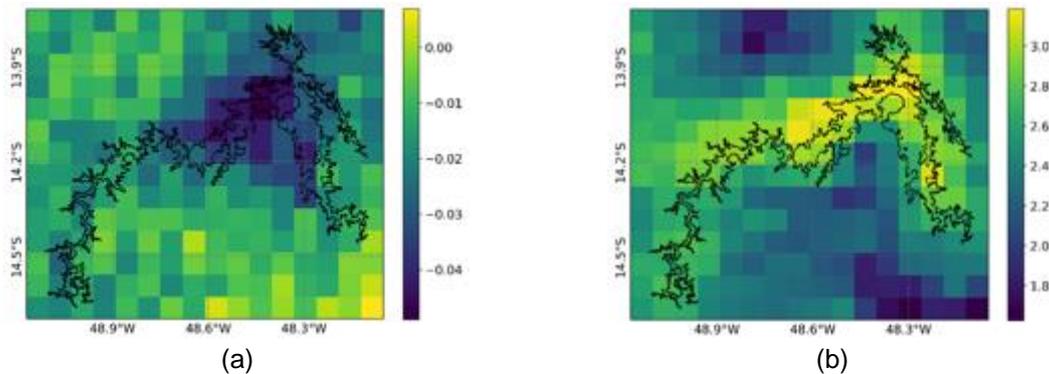


Figura 4 – Diferenças médias entre a) refletância visível (0,6 μm) e (b) infravermelho diário temperatura de brilho (11,0 μm) em K para os períodos (1998-2013) e (1985-1997), respectivamente os períodos posterior e anterior da construção do reservatório Serra da Mesa.

4. CONCLUSÕES

As evidências do impacto do reservatório no clima regional aqui apresentado sugerem que a circulação induzida pela brisa do lago reduz a nebulosidade sobre a área inundada durante o dia. Este mecanismo foi suportado por observações com satélite e in situ. Uma melhor caracterização de frequências e fatores que afetam a dinâmica da brisa do lago em regiões tropicais está sob investigação e será comunicada posteriormente. Do ponto de vista da energia solar, o estudo indicou um incremento de 1,73% na irradiância horizontal global disponível dentro do lago, em média diária, e um ganho de até 4,51% no período vespertino. Este aumento na irradiância solar incidente sobre o reservatório hidrelétrico em comparação com as áreas circundantes corresponde a um aumento relativo no rendimento fotovoltaico anual da média relatada de 1622 kWh/kWp a 1696 kWh/kWp (Pereira et al., 2017). Além disso, como as usinas fotovoltaicas flutuantes (FPV) tendem a ter um desempenho melhor em relação à temperatura, um ganho adicional variando de 10% a 15% pode ser esperado (Rosa-Clot e Tina, 2018), levando a um rendimento fotovoltaico líquido de até 1951 kWh/kWp. Os autores já estão trabalhando na próxima etapa na avaliação do incremento da irradiância solar e do rendimento de FPV em várias usinas hidrelétricas em operação nas diferentes regiões climáticas do território brasileiro com o intuito de produzir informações para apoiar a implantação da

tecnologia FPV. Em um futuro próximo, as usinas híbridas hidro-solar podem se tornar uma ótima alternativa para integrar ambos os recursos devido à alta irradiância solar no território brasileiro combinada com o mecanismo de brisa produzido por um grande número de barragens.

Tabela 2 – Comparação do valor médio anual de cobertura efetiva de nuvens, (C_{eff}) e respectiva influência na irradiância solar incidente na superfície da água e nas áreas circunvizinhas do reservatório de Serra da Mesa. As diferenças matinais não foram significativas (não mostradas).

Área	Valores diários (7h-17h)			Valores vespertinos (14h-16h)		
	C_{eff} avg.	GHI avg.	GHI incremento	C_{eff} avg.	GHI avg.	GHI incremento.
Superfície do reservatório	0.187	523.8	1.73 %	0.196	549.0	4.51%
Margens	0.188	521.6	1.30 %	0.207	542.1	3.20%
Áreas distantes (> 2 km)	0.198	514.9	-	0.234	525.3	-

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio do INCT para Mudanças Climáticas – Fase 2, processos CNPq nº 465501/2014-1, FAPESP nº 2014/50848-9, e CAPES nº 88887.136402/2017-00. Os autores também agradecem o suporte do CNPq na forma de bolsas de produtividade dos autores.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASEFI-NAJAFABADY, S., KNUPP, K., MECIKALSKI, J. R., WELCH, R. M., & PHILLIPS, D. (2010). Ground-based measurements and dual-Doppler analysis of 3D wind fields and atmospheric circulations induced by a mesoscale inland lake. *J. Geo. Res.: Atmos.*, 115(D23).

ASSIREU, A. T.; PIMENTA, F. M. and FREITAS, R. M. (2016). Observações e modelagem da camada limite interna no entorno de extensos sistemas aquáticos, *Ciência e Natura*, vol. 38, pp. 305-311.

BOTTINO, M. J. and CEBALLOS, J. C. (2015). Daytime cloud classification over South American region using multispectral GOES-8 imagery, *International Journal of Remote Sensing*, 36:1, 1-19

CROSMAN, E. T., & HOREL, J. D. (2010). Sea and lake breezes: A review of numerical studies. *Boundary-layer meteorology*, 137(1), 1-29.

EKHTIARI, N.; GROSSMAN-CLARKE, S.; KOCH, H.; MEIRA DE SOUZA, W.; DONNER, R.; and VOLKHOLZ, J. (2017). Effects of the lake Sobradinho reservoir (Northeastern Brazil) on the regional climate. *Climate*, 5(3), 50.

IAKUNIN, M.; SALGADO, R. and MIGUEL POTES (2018). Breeze effects at a large artificial lake: summer case study, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 22, 5191–5210.

MARTINS, F.R., PEREIRA, E. B., SILVA, S.A.B.; ABREU, S.L.; COLLE, S. (2008). Solar energy scenarios in Brazil, Part one: Resource assessment, *Energy Policy*, 36, 8, 2853-2864.

MÖSER, W., & RASCHKE, E. (1984). Incident solar radiation over Europe estimated from METEOSAT data. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 23(1), 166-170.

PEREIRA, E. B., MARTINS, F. R., GONÇALVES, A. R., COSTA, R. S., LIMA, F. J. L., et al. (2017). *Brazilian Solar Energy Atlas (2nd Ed.)*. São José dos Campos: INPE.

RABIN, R. M., STADLER, S., WETZEL, P. J., STENSRUD, D. J., & GREGORY, M. (1990). Observed effects of landscape variability on convective clouds. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 71(3), 272-280.

ROSSOW, W. B., and L. C. GARDER. (1993). Cloud Detection Using Satellite Measurements of Infrared and Visible Radiances for ISCCP. *Journal of Climate* 6: 2341–2369.

SEGAL, M., ARRITT, R. W., SHEN, J., ANDERSON, C. and LEUTHOLD, M (1997). On the Clearing of Cumulus Clouds Downwind from Lakes, *Monthly Weather Review*, 125, 4.

SILVA DIAS, M. A. F.; SILVA DIAS, P. L.; LONGO, M.; FITZJARRALD, D. R.; and A. S. DENNING (2004). River breeze circulation in eastern Amazonia: observations and modeling results. *Theor. Appl. Climatol.* 78, 111–121.

STIVARI, S. M.; DE OLIVEIRA, A. P.; and SOARES, J. (2005). On the climate impact of the local circulation in the Itaipu Lake area. *Climatic Change*, 72(1-2), 103-121.

STUHLMANN, R., RIELAND, M., & PASCHKE, E. (1990). An improvement of the IGMK model to derive total and diffuse solar radiation at the surface from satellite data. *Journal of Applied Meteorology*, 29(7), 586-603.